

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-655-07

# 不同施工阶段隧道内粉尘分布研究

魏雨阳 狄育慧 李若溶

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 在隧道施工的过程中, 施工工序较为繁琐, 施工环境相对闭塞, 致使隧道在施工过程中产生的粉尘含量极高, 施工工人很难采取有效的防护措施。因此, 明确隧道在施工中粉尘的组成特征及分布规律已经成为亟待研究的重要问题。以此为主要研究对象, 采用单点测试法沿隧道纵深布置 12 个测点, 探究隧道施工中三个主要施工阶段—掌子面开挖、初期支护以及二次衬砌的粉尘形成和分布规律, 其中掌子面开挖、隧道的初期支护均在每开挖 3m 后进行测试, 二次衬砌测试是等隧道施工完毕后进行粉尘浓度测试, 进而提出相应的隧道粉尘防治以及工人的防护措施, 为了详细分析粉尘浓度, 测试了 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>1</sub>、PM<sub>4</sub>、TSP 五种隧道施工过程中主要粉尘的颗粒物浓度, 发现在掌子面开挖以及初期支护阶段, 粉尘浓度随隧道进深增加而增长; 而在二次衬砌阶段, 粉尘浓度随进深增加先减后增等规律。对斜井隧道施工中粉尘的基本组成成分以及分布规律研究提供相应的借鉴, 也对如何解决施工中工人的身体健康问题提供相应的理论参考。

**【关键词】** 斜井隧道; 粉尘; 分布规律; 组成特征; 粉尘防治

中图分类号 U455 文献标志码 A

## Study on Dust Distribution in Tunnel at Different Construction Stages

Wei yuyang Di yuhui Li ruorong

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** During the tunnel construction process, the construction procedures are cumbersome, and the construction environment is relatively closed, resulting in extremely high dust content produced during the construction of the tunnel, making it difficult for construction workers to take effective protective measures. Therefore, clarifying the composition characteristics and distribution patterns of dust in tunnel construction has become an important issue to be urgently studied. This article takes this as the main research object, arranges 12 measuring points along the tunnel depth, and explores the formation and distribution patterns of dust in three main construction stages of tunnel construction—excavation of the working face, initial support, and secondary lining. It then proposes corresponding measures for tunnel dust control and workers' protection. The study finds that the main dust produced during the tunnel construction process includes PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>, PM<sub>4</sub>, and TSP. It is found that during the excavation of the working face and the initial support stage, the dust concentration increases with the increase in tunnel depth; while in the secondary lining stage, the dust concentration first decreases and then increases with the increase in depth. This research provides a reference for the study of the basic composition and distribution patterns of dust in the construction of inclined shaft tunnels and also offers a theoretical reference for solving the physical health problems of workers during construction.

**【Keywords】** Inclined shaft tunnel; Dust; Distribution law; Compositional characteristics; Dust prevention

## 0 引言

截至 2020 年底,中国完成建设的公路隧道数量达到 21316 座,总长度为 21999.3 公里。在这些隧道中,特长隧道共有 1394 座,其总长度达到 6235.5 公里;而长隧道的数量为 5541 座。2016~2020 年,中国公路隧道以每年超过 1000 座且长度超过 1200km 的速度急剧增长。长度超过 10km 的特长公路隧道已建成 18 座,其中近 5 年建成 9 座,在建 22 座<sup>[1]</sup>;于 2021 年 9 月 30 日建成通车的秦岭天台山隧道(双向六车道,长 15.56km)是世界上建设规模最大的高速公路隧道<sup>[2]</sup>;在建的天山胜利隧道(长 22.13km)将成为世界上最长的高速公路隧道。

由此可见我国隧道的发展已经迈入了高速发展阶段,隧道环境严重危害着施工人员的身体健康,尘肺病<sup>[3]</sup>人数占职业病总人数接近九成,发病率极高,且隧道在建设过程中施工工序较为繁琐,工人施工环境相对闭塞,导致隧道在施工中空气较为浑浊,粉尘浓度极高,现场施工人员的身体健康和施工质量均受到极大影响,虽然在建筑工地施工的过程中,污染物的治理工作已经在积极的开展,但由于施工现场的建筑工人作业环境比较恶劣,施工技术含量相对低下,使得工人在施工中不能采取有效的防护措施,隧道工人在密闭状态下工作的身体状况令人十分堪忧,工作场地的粉尘浓度和通风状况是引起尘肺病的主要因素<sup>[4]</sup>,其次隧道施工过程中产生的颗粒物,作为大气中颗粒物的主要来源—开放源类,治理与控制的难度比较大,黄土隧道施工工人在密闭状态下工作的身体状况令人十分堪忧<sup>[5]</sup>,隧道通风除尘工作不容忽视。

其中国外粉尘扩散规律的研究现状,在 1971 年,美国就开始对大气颗粒物进行研究,并研究制定出了总悬浮颗粒物(TSP)的环境质量标准。日本、英国、法国、德国也在粉尘的形成扩散规律方面展开大量的研究工作。国外最早对粉尘粒子运动展开研究的学者是 Fuchs,他将空气中的粉尘测量假设为气溶胶,在此基础上研究了其运动扩散的相关规律<sup>[6]</sup>。Reyleigh、Stoke 等学者研究了粒子在流体中的受力情况,并且建立了相应的阻力公式<sup>[7]</sup>。Bhskar 等学者不仅研究了气流中颗粒物的运动规律,并且建立了颗粒物在大气中的扩散方程,给出了相应的求解方法<sup>[8]</sup>。WaltonA 等学者将粉尘排放

假设成固定放射源,研究了尘粒在大气中的扩散规律,此研究为日后的粉尘运动规律提供了新思路<sup>[9]</sup>。

国内对粉尘浓度的研究主要以钻爆法施工的隧道为主,孙忠强等<sup>[10]</sup>对一个断面隧道的出渣过程进行了深入研究。他们首先在现场设置了监测点,并进行了实地采样以测量粉尘浓度。随后,基于这些测量结果,他们使用 GAMBIT 软件进行了建模,并利用 FLUENT 这一数值模拟软件模拟了出渣过程中粉尘的运动。模拟结果显示,装渣地点的粉尘浓度最高<sup>[11]</sup>。乔力伟等<sup>[12]</sup>研究了施工隧道通风位置与污染物浓度场演化的关系,结果显示当通风管出口位于隧道拱顶中央时,施工作业区内气流流场相对较为稳定。在相同通风时段内,通风管出口位于隧道拱顶中央时,粉尘和气体浓度值降低的速率相较之下较高。

尽管过去几十年国内外的研究者在隧道施工中粉尘的分布规律和控制技术方面取得了一系列进展,但现有研究仍存在一些不足之处,比如以往的研究多聚焦于某一阶段粉尘粒子自身的运动和扩散规律,往往基于简化的假设,将粉尘排放看作固定放射源,可能无法准确捕捉施工过程中粉尘扩散的复杂性,同时较少综合考虑不同的施工工艺采用的施工工序、施工材料有所差异,致使不同工序下产生粉尘的浓度及分布规律有所不同,无法进行针对性治理。本研究采用整体方法,表征了隧道施工中不同施工工艺下产生的粉尘的基本组成和分布规律。这种详细的分析超越了对粉尘体积的传统关注,包括粒径差异(PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP)及其在施工阶段的不同行为。同时明确每一工序的主要施工方法以及产尘的主要因素,对于分析研究不同施工工序下的粉尘浓度分布规律奠定一定的基础,得到的隧道施工期粉尘浓度的分布规律,对日后更为有效的控制隧道施工中的粉尘浓度也有着较大的意义。

## 1 研究方案设计

### 1.1 研究环境

本研究项目主要选取西安市某大型地下综合项目进行跟踪测试,选择幸福路 K4+320 隧道作为测试的对象,该隧道内尺寸为 3.545m,长度为 33.39m,内底高程 399.296m,埋深为 12.8m。本课

题主要对隧道施工过程中的三个主要工序进行测试分析,即掌子面的开挖、初期支护阶段以及二次衬砌阶段作为研究的重点。

国家环境标准 GB 3095-1966《环境空气质量标准》采用总悬浮颗粒物(TSP)。颗粒物可按粒径分为降尘、TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>4</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>1</sub>,其中降尘为粗颗粒,粒径100~1000 $\mu\text{m}$ ,能快速沉至地面;TSP指直径<100 $\mu\text{m}$ 颗粒;PM<sub>10</sub>为直径<10 $\mu\text{m}$ 颗粒,能进入呼吸道,PM<sub>4</sub>、PM<sub>2.5</sub>可以直接进入人体的支气管中,而PM<sub>1</sub>的颗粒物可以直接进入人体的肺泡中,通过气体交换被人体组织吸收,这些粉尘颗粒较小但对人体的危害较大,而标准仅设定TSP、PM<sub>10</sub>的值,未规定PM<sub>4</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>1</sub>的标准。但在实际工程项目施工时,这些粉尘的污染是不能忽视的,这将影响环境影响评价的科学性<sup>[13]</sup>。

## 1.2 研究对象

隧道施工主要采取上下台阶法。核心施工流程包括以下几个主要步骤:首先进行拱部超前注浆以及大管棚和小导管的施工,接着是上半部分断面的环形开挖并保留核心土,然后进行上半断面的初期支护工作。随后是下半部分断面的开挖,接着进行下半断面的初期支护。之后是隧道仰拱的二次衬砌施工,最后进行隧道拱墙的防水层及二次衬砌施工。

掌子面开挖时,首先要根据施工现场与隧道地形及围岩结构确定开挖的方式。所遵循的施工原则包括“先期管控、严格注浆、限制进尺、加强支护、尽早封闭、勤于测量”,而隧道的挖掘则是采用了台阶法进行施工,台阶法适用于土质较为良好的隧道中,一般采用人工和机械相互配合的开挖方式,其施工效率较高,工期较短,工程造价相对较低。在本次挖掘工程中,采用了上下台阶的开挖方式。依据早期成环原则,台阶的长度应适中,既不能过长以确保掌子面的稳定性和施工的安全性及便利性,也不宜过短。结合施工现场的实际情况,台阶的长度定为3.0米。在开挖上台阶时,应当适当保留核心土层,这样做既不会影响钢架安装和喷射混凝土等后续工序的进行,其宽度大约维持在1.5米左右。

初期支护是隧道施工过程中最为重要的一个工序,可以保证围岩的稳定性,进而保证整个工程

的安全和稳定,因此,在隧道施工的过程中,要确保初期支护工作的有效性和及时性。在初期支护的过程中,主要的施工工序有挂钢筋网、喷射混凝土、格栅/型钢拱架、拱部中空锚杆和边墙砂浆锚杆组成。采用干喷法喷射混凝土。

隧道二次衬砌施工是指在隧道的初期支护工作完成后,使用混凝土再次进行衬砌工作,使其与初期支护工作形成了一种复合式的衬砌工作。相比与初期支护,二次衬砌是在原有的基础上对隧道进行优化,从而是隧道更能满足使用要求。二次衬砌一般是在围岩和初期支护趋于稳定后进行。

由经验可知,其中掌子面的开挖(包括上、下断面开挖)、初期支护、以及二次衬砌这三个阶段粉尘浓度较大,空气污染尤为严重,故本文主要针对隧道施工中这三个工序下粉尘浓度的组成特征、分布规律以及温湿度进行研究,进而提出能够减轻施工隧道粉尘扩散以及改善温湿度环境的措施,以达到改善隧道施工环境的目的。

## 1.3 研究方案设计

本课题对西安市某大型地下综合空间建设工程进行跟踪测试,选择该项目中电力V型C-2-a(1)暗挖支廊隧道作为测试的对象,该隧道采用的施工方法为台阶法。本课题主要对隧道施工过程中的三个主要工序进行测试分析,即掌子面的开挖、初期支护阶段以及二次衬砌阶段。本次测试的隧道全长为33m,沿隧道纵深每隔3米布置一组测点,在粉尘浓度测试的过程中,测试点布置在隧道断面的两侧及中心位置,共计布置12组测点,测点布置如图1所示,在每次测试开始前,先使用手持式激光测距仪D2确定测点位置,再使用美国Metone831便携式四通道粉尘检测仪测量粉尘浓度,每次测量均按照先测左边测点再中间后右边的顺序进行测量,每次取样时间均为1分钟,测点高度考虑到工作需求如需弯腰施工,机械设备高度,以及隧道狭窄等问题,故选取距离地面的高度为1.2米的位置,此高度正好处于隧道施工人员呼吸带范围内,最终以这三点浓度值的平均值作为该进深下的污染物浓度值。掌子面开挖和初期支护阶段均在每开挖3米后进行测量,二次衬砌阶段则在施工完毕后测量粉尘浓度。为了消除因测试时间不同粉尘沉降而产生的误差,同一断面测试均在相同时间间隔内进行,并确保测试过程中隧道内的通风条件和施工活

动一致以减少环境变化对测试结果的影响。测试过程中，记录每次测量的数据，并使用数据分析软件整理和分析粉尘浓度随施工阶段和进深的变化情况，以确保数据的准确性和可比性。

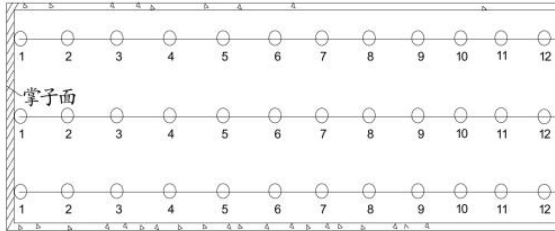


图 1 粉尘测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of dust measuring point layout

测试期间，主要使用的仪器有：

(1) 手持式激光测距仪 D2：测量范围为 0.05-100m，测量精度为±1.5mm，测量单位为 m，主要用来测量隧道内部到洞口以及隧道内部测点之间的距离，如图 2 左。

(2) 美国 Metone831 便携式四通道粉尘检测仪：可以同时检测 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub> 这四种颗粒物的浓度。该仪器的流量为 0.1cfm (2.831/min)，量程为 0-1000 μg/m<sup>3</sup>，分辨率为 0.1 μg/m<sup>3</sup>，最小测量粒径为 0.5 μm，工作温度为 0-50°C，该仪器单次取样时间为 1min，1min 内可从环境中取样十次，最后的显示结果为 1min 内取样结果的平均值，如图 2 右。



图 2 测试所用仪器

Fig.2 Test instrument

## 2 测试结果

### 2.1 污染物浓度与隧道进深

如图 3 所示，在掌子面开挖时期，各个污染物浓度均随着隧道进深的增加呈现先减少后增加的趋势，从图中可知部分污染物之间的浓度差以及各个污染物浓度的波动范围。污染物 TSP 以及 PM<sub>10</sub>

的浓度远远大于其余三种，污染物 TSP 的浓度波动范围为 447-1376 μg/m<sup>3</sup>，PM<sub>10</sub> 的波动范围为 339-993 μg/m<sup>3</sup>，PM<sub>1</sub> 的波动范围为 52-93 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>2.5</sub> 为 64-138 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>4</sub> 为 100-197 μg/m<sup>3</sup>；相比于其他污染物，PM<sub>10</sub> 的浓度对 TSP 浓度的贡献极大；在此阶段，污染物 TSP 浓度值增加了 929 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>10</sub> 浓度增加了 654 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>4</sub> 浓度增加了 97 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>2.5</sub> 浓度增加了 74 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>1</sub> 浓度增加了 41 μg/m<sup>3</sup>。

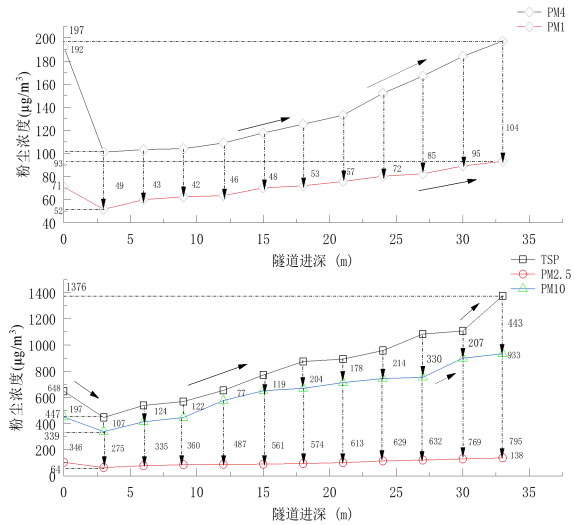


图 3 掌子面开挖时污染物浓度随隧道进深的变化

Fig.3 Changes of pollutant concentration with tunnel depth during the excavation of the palm face

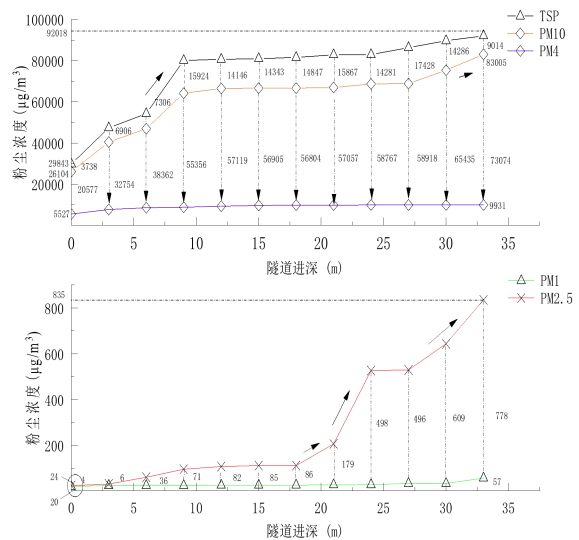


图 4 初期支护开挖时污染物浓度随隧道进深的变化

Fig.4 Changes of pollutant concentration with tunnel depth during initial support excavation

由图 4 可知，初期支护时各个污染物的浓度值

相差较大, 各个污染物浓度均随着隧道进深的增加逐渐增大, TSP 浓度的波动范围为 29843-92018  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM<sub>10</sub> 浓度的波动范围为 26104-83005  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>4</sub> 的波动范围为 5527-9931 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。各个污染物之间的浓度差已在图中标注出来, 浓度差值最大的两种污染物为 PM<sub>10</sub> 与 TSP; 污染物 PM<sub>1</sub> 的浓度波动范围为 20-57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub> 的波动范围为 24-835 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 在此阶段, TSP 浓度增加了 62175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>10</sub> 浓度增加了 56896 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>4</sub> 浓度增加了 4404 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>1</sub> 浓度增加了 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub> 浓度增加了 811 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

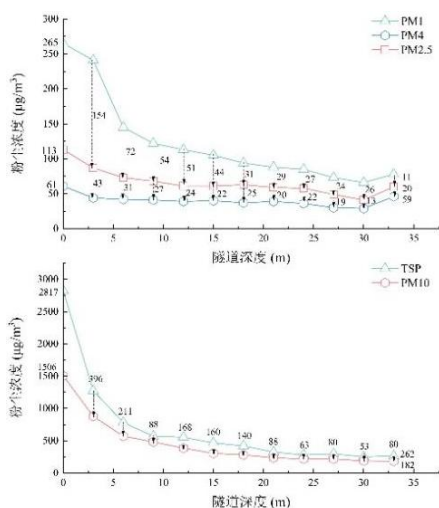


图 5 二次衬砌开挖时污染物浓度随隧道进深的变化  
Fig.5 Changes of pollutant concentration with tunnel depth during secondary lining excavation

由图 5 可知, 在隧道二次衬砌过程中, 污染物浓度随着隧道进深呈现先下降后上升的趋势, 隧道洞口的污染物浓度最大, 污染物浓度由隧道口到隧道进深为 3m 时下降速度最快; 在隧道进深为 30m 时, 污染物浓度最小, 隧道最里端污染物浓度较大, 这主要是因为二次衬砌采用的湿喷法, 随着隧道进深增加, 湿度越大, 粉尘浓度逐渐减少, 在隧道最内侧, 污染物难以消散, 粉尘浓度有所增加。从图中还可看出污染物 TSP 的浓度范围为 250-2816 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>10</sub> 的浓度范围为 187-1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>1</sub> 的浓度波动范围为 45-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>4</sub> 的浓度波动范围为 79-264  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>2.5</sub> 的波动范围为 54-113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 在此阶段, TSP 的总浓度共下降 2566 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>10</sub> 的总浓度共下降 1313 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>1</sub>

浓度下降了 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>4</sub> 浓度下降了 185 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub> 浓度下降了 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.2 污染物浓度与施工时间的关系

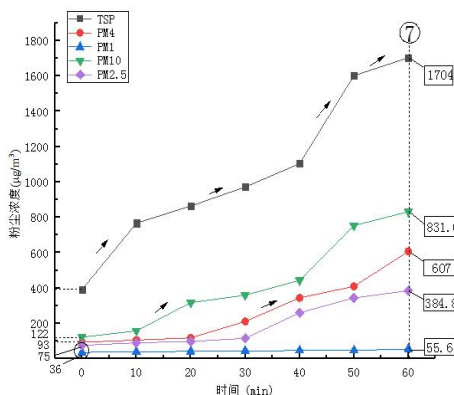


图 6 掌子面开挖时污染物浓度随施工时间的变化图  
Fig.6 Variation of pollutant concentration with construction time during excavation of palm face

从图 6 可知, 这五种污染物浓度随着施工时间的增加而增大, 随着施工时间的增加, PM<sub>4</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、TSP 的浓度随着施工时间的增长变化幅度较大, 而 PM<sub>1</sub> 的浓度值趋于平稳, 变化幅度较小。从图中可以看出在污染物 TSP 的浓度在施工的前 10 分钟、20-30 分钟、40-50 分钟以及 50-60 分钟内相较于其它污染物变化较快; 污染物 PM<sub>10</sub> 的浓度在施工开始的 10-20 分钟内变化较快; 污染物 PM<sub>4</sub> 浓度的增加主要在施工的 30-40 分钟左右。且各粉尘浓度在这项工序结束时达到最大, 最大值可以从图中读出。

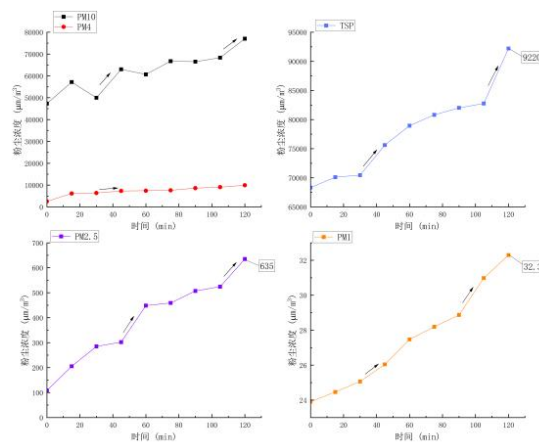


图 7 初期支护时污染物浓度随施工时间的变化  
Fig.7 Changes of pollutant concentration with construction time during initial support

由图 7 可知, 此阶段各种污染物的浓度值差异

较大,但都随着施工时间的增长呈现递增趋势,污染物  $PM_{10}$ 、TSP 的浓度值远远大于  $PM_1$ 、 $PM_4$ 、 $PM_{2.5}$ ,各污染物的浓度值在施工结束时达到最大。从图还可读出各个污染物的浓度变化范围,TSP 浓度的范围为  $65369\text{--}92019\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$  的浓度范围为  $50000\text{--}77034\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $PM_4$  的浓度变化范围为  $5500\text{--}10000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。  $PM_{2.5}$  的浓度波动范围为  $108\text{--}643\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而  $PM_1$  浓度随着施工时间的增加变化幅度不大,为  $24\text{--}32.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;在此阶段,TSP 浓度增加了  $26623\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$  浓度增加了  $27034\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_4$  浓度增加了  $4500\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2.5}$  浓度增加了  $535\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_1$  浓度增加了  $8.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,因此施工时间并不是影响  $PM_1$  浓度的重要因素。

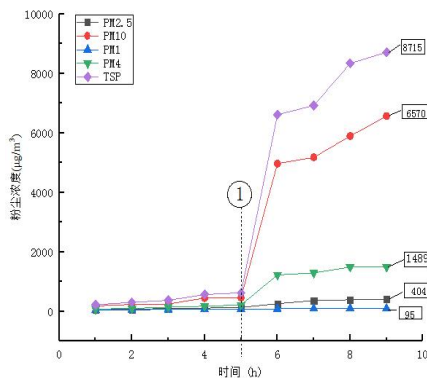


图8 二次衬砌时污染物浓度随施工时间的变化

Fig.8 Changes of pollutant concentration with construction time during secondary lining

从图8可以看出,污染物浓度在5小时以前,变化幅度较小,浓度范围为  $50\text{--}1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,但在施工5小时后,污染物浓度有了显著增加,TSP与  $PM_{10}$  的浓度变化尤为明显,这主要是由于这主要是由于在二次衬砌阶段进行的工序较为繁多,经历从钢筋的安装到喷射混凝土阶段,在钢安装阶段,各污染物浓度变化比较小,而在喷射混凝土阶段,污染物浓度急剧上升。在喷射混凝土阶段,污染物浓度变化的幅度为  $TSP > PM_{10} > PM_4 > PM_{2.5} > PM_1$ ,由图可知,此时  $PM_1$  的浓度变化幅度较小,趋于平稳。

同时可用各个颗粒物的净浓度除各个施工工序下的总悬浮颗粒物的净浓度即得到了各个颗粒物对总悬浮颗粒物的贡献比。在掌子面开挖阶段,  $PM_1/\text{TSP}$  的值在  $0.027\text{--}0.106$  之间,均值为  $0.05$ ;  $PM_{2.5}/\text{TSP}$  的值在  $0.112\text{--}0.226$  之间,均值为  $0.174$ ;

$PM_4/\text{TSP}$  的值在  $0.238\text{--}0.356$  之间,均值为  $0.236$ ;  $PM_{10}/\text{TSP}$  的值在  $0.312\text{--}0.488$  之间,均值为  $0.373$ 。在初期支护阶段,  $PM_1/\text{TSP}$  的值在  $0.000351\text{--}0.00038$  之间,均值为  $0.000362$ ;  $PM_{2.5}/\text{TSP}$  的值在  $0.002\text{--}0.006$  之间,均值为  $0.005$ ;  $PM_4/\text{TSP}$  的值在  $0.084\text{--}0.121$  之间,均值为  $0.111$ ;  $PM_{10}/\text{TSP}$  的值在  $0.769\text{--}0.872$  之间,均值为  $0.825$ ;在二次衬砌阶段,  $PM_1/\text{TSP}$  的值在  $0.01\text{--}0.2$  之间,均值为  $0.09$ ;  $PM_{2.5}/\text{TSP}$  的值在  $0.046\text{--}0.24$  之间,均值为  $0.15$ ;  $PM_4/\text{TSP}$  的值在  $0.17\text{--}0.38$  之间,均值为  $0.27$ ;  $PM_{10}/\text{TSP}$  的值在  $0.66\text{--}0.81$  之间,均值为  $0.75$ 。

### 3 结论

本文在暗挖隧道施工的各项工序的基础上,针对不同施工工序的施工内容做了简单介绍,进一步明确各项工序的产尘原因及规律,最后对粉尘浓度与隧道进深及施工时间的关系进行分析,得出了粉尘浓度随隧道进深以及施工时间的变化情况,最后得出了各个颗粒物在不同施工工序下的贡献率以及不同施工工序下粉尘浓度的百分比,为粉尘治理奠定一定基础,主要内容总结如下:

(1) 粉尘浓度与隧道进深的关系:掌子面开挖阶段:在此阶段,粉尘浓度随隧道进深的增加呈现出先减少后增加的趋势。这可能与施工初期地面扰动较大、空气流通性较好有关,而隧道深入后地面扰动减少,空气流通性变差,导致粉尘浓度上升。在初期支护阶段,粉尘浓度随隧道进深的增加逐渐增大。这表明在进行初期支护施工时,随着工作面的推进,粉尘产生量增加,通风条件相对恶化,从而导致粉尘浓度升高。而在二次衬砌阶段:粉尘浓度随隧道进深呈现先下降后上升的趋势。这一阶段使用的湿喷法可能在一定程度上抑制了粉尘的产生和扩散,但在隧道深部,由于通风困难,粉尘浓度仍有所上升。

(2) 粉尘浓度与施工时间的关系:掌子面开挖与初期支护:在这两个阶段,所有类型的粉尘浓度随施工时间的增加而增大,表明施工活动的持续进行会不断产生粉尘,且随着时间的推移,粉尘累积效应更为明显。但在二次衬砌阶段,施工初期粉尘浓度变化不大,但随着施工进入关键阶段,尤其是喷射混凝土过程,粉尘浓度急剧上升。这说明二

次衬砌过程中的某些操作,尤其是喷射混凝土,是粉尘产生的主要源头。

(3) 各粉尘对总悬浮颗粒物的贡献比排序大小为二次衬砌>初期支护>掌子面的开挖。 $PM_{10}/TSP$ 在各阶段的贡献率为二次衬砌>掌子面开挖>初期支护; $PM_{2.5}/TSP$ 在各阶段的贡献率为掌子面开挖>二次衬砌>初期支护; $PM_4/TSP$ 在各阶段的贡献率为二次衬砌>掌子面开挖>初期支护; $PM_{10}/TSP$ 在各阶段的贡献率为初期支护>二次衬砌>掌子面开挖。通过分析贡献率我们可以更直观地看到不同粒径粉尘在各施工阶段的变化情况。这有助于我们识别主要污染源,并在不同施工阶段采取对应的控制措施。

#### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述.2022[J].中国公路学报,2022,35(4):40.
- [2] 世界工程量和建设规模第一的公路隧道—秦岭天台山隧道在陕西贯通[J].隧道建设,2021,41(1):76.
- [3] 宋富美,李季.我国煤矿尘肺病现状及预防对策研究[J].煤矿安全,2014,45(5):231-233,237.
- [4] 谢德兴,温建斌.闽西煤矿尘肺发病状况及影响因素研究[J].中国卫生工程学,2018,17(4):523-525.
- [5] 郭中峰.煤矿粉尘对人体健康的危害及防治措施研究[J].河北企业,2018,(11):45-46.
- [6] Fuchs N. A(著),顾震潮(译).气溶胶力学[M].北京:科学出版社,1960.
- [7] 童志权.大气污染控制工程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [8] Bhaskar R, Ramani, RV. Behavior of Dust Clouds in Mine Airways[J]. SME Transactions, 1986,(280):31-40.
- [9] Waiton A, Cheng A Y S. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-part II; idealise canyon simulation[J]. 2002,36(22):3615-3627.
- [10] 孙忠强,苏昭桂.隧道出渣过程粉尘扩散规律研究[J].工业安全与环保,2017,43(2):100-103.
- [11] 孙忠强,方宝君.施工隧道内粉尘受力分析及其运动研究[J].煤炭技术,2016,35(5):176-178.
- [12] 乔力伟,蒋葛夫.施工隧道通风位置与污染物浓度场演化特征关系分析[J].环境工程,2018,36(9):74-80.
- [13] 董芹.公路建设项目施工过程中粉尘的测定研究[D].西安:长安大学,2006.
- [14] 谢德兴,温建斌.闽西煤矿尘肺发病状况及影响因素研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [15] 郭超.多功能太阳能光伏光热集热器的理论和实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- [16] 赵江东.太阳能空心通风内墙蓄放热过程实验与理论研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [17] 金虹.严寒地区村镇住宅冬季室内热舒适环境研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(12):2108-2111.
- [18] Yang X J, Sun L L, Yuan Y P, et al. Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system[J]. Renewable energy, 2018, 119:152-159.
- [19] GB50495-2019,太阳能供热采暖工程技术规范:GB50495-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

(上接第 641 页)